ISSN 1999-4125 (Print) **ISSN 2949-0642 (Online)**

ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД, РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА
GEOMECHANICS, DESTRUCTION OF ROCKS BY EXPLOSION, MINE AEROGASDYNAMICS AND MINING THERMOPHYSICS

Научная статья
УДК 622.823
DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-135-143

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПУЧЕНИЯ ПОЧВЫ ПЛАСТОВЫХ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК ВНЕ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ ОЧИСТНЫХ РАБОТ

Гоголин Вячеслав Анатольевич[1], Семенцов Вячеслав Владимирович[2], Ермакова Инна Алексеевна[1]

[1] Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева
[2] АО «НЦ ВостНИИ»

[*] для корреспонденции: eia.pm@kuzstu.ru

Аннотация.
В работе рассматривается механизм пучения почвы подготовительных пластовых выработок в модели линейной деформации вмещающих пород и угольных пластов. Предложена постановка задачи и расчетная схема для определения напряженно-деформируемого состояния (НДС) массива горных пород, включающего породы кровли, почвы, непосредственной почвы и угольный пласт. Процесс набухания почвы не рассматривался. Влияние очистных работ на пучение почвы подготовительной выработки не учитывалось. Расчетной областью задачи являлось поперечное сечение подготовительной выработки, в котором реализуется плоско-деформированное состояние массива горных пород. Расчет НДС массива горных пород выполнялся методом конечных элементов по лицензионной программе ELCUT. Установлено влияние деформационных характеристик непосредственной почвы на величину пучения. При этом основное влияние на величину пучения почвы оказывает модуль линейных деформаций непосредственной почвы. Найдено наибольшее значение модуля линейных деформаций непосредственной почвы пласта, определяющее критическое значение пучения почвы для сохранения работоспособности выработки. Получены зависимости величины пучения почвы от глубины проведения выработки и мощности непосредственной почвы. Установлено, что при увеличении мощности непосредственной почвы величина пучения увеличивается до определенного значения. При изменении мощности непосредственной почвы наблюдается различный вид ее контура: от выпуклости до вогнутости. Результаты данной работы могут быть использованы для оценки эффективности способов предупреждения пучения почвы пластовых выработок угольных пластов, таких как: анкерование, бетонирование, проведение разгрузочных щелей и других, в различных горно-геологических и горнотехнических условиях проведения выработок.

CC BY

Информация о статье
Поступила:
02 мая 2026 г.

Одобрена после рецензирования:
01 сентября 2026 г.

Принята к публикации:
15 сентября 2026 г.

Ключевые слова:
пучение почвы, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, подготовительная выработка

Для цитирования: Гоголин В.А., Семенцов В.В., Ермакова И.А. Численная оценка пучения почвы пластовых подготовительных выработок вне зоны влияния очистных работ // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 4 (176). С. 135-143. DOI: 10.26730/1999-

4125-2026-4-135-143, EDN: DLMXUZ

Введение

Пучение почвы горных выработок является одним из основных негативных проявлений горного давления. Наиболее часто пучение почвы проявляется при проведении подготовительных выработок [1, 2]. Пучение почвы имеет несколько причин или механизмов деформирования непосредственной почвы. Основными причинами пучения почвы является воздействие горного давления и разбухание непосредственной почвы при ее увлажнении, а также возможно сочетание этих воздействий [3–7]. Для описания этого процесса выбрана линейно-деформируемая модель поведения горных пород, позволяющая описать процесс пучения почвы как проявление горного давления. Такая модель поведения горных пород представлена в аналитических исследованиях пучения [8–10] и численного моделирования этого процесса [11–13]. Основные результаты получены для оценки эффективности способов устранения пучения почвы [14–18]. В данной работе исследуется процесс пучения почвы, обусловленный перераспределением напряженно-деформированного состояния массива горных пород после проведения подготовительной выработки по пласту вне зоны влияния очистных работ.

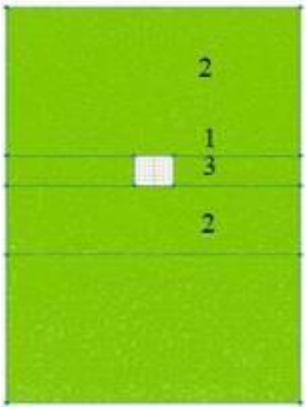

Рис. 1. Расчетная область задачи с сеткой конечных элементов:
1 – пласт; 2 – вмещающие породы; 3 – непосредственная почва
Fig. 1. Computational domain of the problem with a finite element mesh:
1 – seam; 2 – host rocks; 3 – immediate soil

Постановка задачи

Рассматривается плоское сечение подготовительной выработки, пройденной по угольному пласту мощностью три метра. Выработка имеет следующие размеры: ширина – 4 метра, высота – 3 метра. В этом сечении выделяется расчетная область, показанная на Рис. 1.

Расчетная область содержит 3 блока: 1 – пласт; 2 – вмещающие породы; 3 – непосредственная почва. Размеры расчетной области составляют 30 метров по горизонтали и 40 метров по вертикали. Размеры области выбраны из условия отсутствия влияния выработки на напряженное состояние массива горных пород. Высота кровли составляла 15 метров, высота почвы – 25 метров. Мощность непосредственной почвы варьировалась от 0 до 12 метров.

Расчетная схема включает в себя следующие граничные условия: верхняя граница нагружена вертикальной нагрузкой, соответствующей глубине проведения выработки, то есть γH, касательные напряжения равны нулю; на вертикальной границе и на нижней границе нормальные перемещения и касательные напряжения равны нулю.

Вмещающие породы и угольный пласт принимаются линейно деформируемыми со следующими осредненными деформационными характеристиками: модуль деформации породы 10^4 МПа, коэффициент поперечных деформаций 0,2; модуль деформации пласта 10^3 МПа, коэффициент поперечных деформаций 0,25. Модуль линейных деформаций непосредственной почвы изменялся от 10 МПа до 10^3 МПа, коэффициент поперечных деформаций изменялся от 0,2 до 0,45.

Расчеты напряженно-деформированного состояния массива горных пород выполнялись методом конечных элементов по лицензионной программе «Elcut». Число узлов сетки конечных элементов выбиралось из условия достаточной точности значений вычисляемых величин и в проведенных расчетах составляло порядка $10^5 \div 3 \cdot 10^5$, или 100 узлов на 1 м^2 области в среднем. Такое число узлов сетки конечных элементов позволило проводить расчеты напряжений с погрешностью менее 2%.

Величина пучения почвы u (наибольшие вертикальные смещения непосредственной почвы) вычислялась в два этапа. На первом этапе рассчитывалось начальное вертикальное смещение почвы u_0 до проведения выработки в соответствии с расчетной схемой (см. Рис. 1), где выработка заменялась участком пласта. На втором этапе проводились расчеты полной величины вертикальных смещений почвы u_1 с учетом выработки по расчетной схеме. Тогда величина пучения почвы, вызванная проведением выработки, находилась как $u = u_1 - u_0$.

Аналогично определялись вертикальные смещения кровли выработки w, вызванные ее проведением: $w = w_1 - w_0$, где w_0 – начальное смещение кровли до проведения выработки; w_1 –

полная величина смещения кровли после проведения выработки.

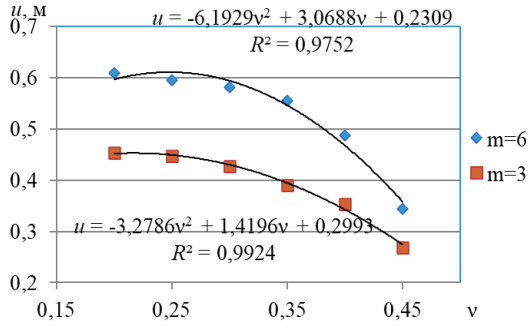

Рис.2. Зависимости величины пучения почвы u от коэффициента поперечных деформаций ν
Fig. 2. Dependence of the magnitude of soil heaving u on the coefficient of transverse deformation ν

Результаты исследований

На первом этапе исследований изучено влияние деформационных характеристик непосредственной почвы на величину ее пучения.

1) Влияние модуля поперечных деформаций непосредственной почвы на величину ее пучения.

Были проведены численные эксперименты со следующими значениями:

– модуль поперечных деформаций – от 0,2 до 0,45 с шагом 0,05;

– мощность непосредственной почвы *m* составляла 3 м и 6 м.

– глубина проведения выработки равнялась 400 м,

– модуль линейных деформаций непосредственной почвы – 50 МПа.

Полученные зависимости величины пучения почвы *u* от модуля поперечных деформаций *E* показаны на Рис. 2.

При увеличении коэффициента поперечных деформаций от 0,2 до 0,45 величина пучения почвы уменьшается по параболическому закону, показанному на Рис. 2.

Для большинства горных пород значения коэффициентов поперечных деформаций ν находятся в пределах 0,2÷0,3 [19]. Как показали расчеты (см. Рис. 2), в данных границах изменения значений коэффициента ν величины пучения почвы различаются не более чем на 10%.

Поэтому в дальнейших расчетах значение этого коэффициента было принято 0,25.

2) Влияние модуля линейных деформаций непосредственной почвы на величину ее пучения.

Численные эксперименты были проведены со значениями:

– модуль линейных деформаций принимал значения от 10^7 Н/м^2 до 10^{10} Н/м^2 с шагом $5\cdot10^6$ Н/м^2 (для наглядности полученных результатов значения модуля линейных деформаций были представлены десятичными логарифмами их значений от 7 до 10);

– глубина проведения выработки равнялась *H*=400 м;

– мощность непосредственной почвы *m* составляла 3 м.

На Рис. 3 показана полученная зависимость величины пучения почвы *u* от значения модуля линейных деформаций непосредственной почвы в логарифмической шкале.

Как следует из Рис. 3, значительное пучение почвы проявляется при значениях lg*E* от 7 до 8, что соответствует значениям модуля линейных деформаций непосредственной почвы от 10^7 Н/м^2 до 10^8 Н/м^2.

При значениях lg*E* от 8 до 9 (*E* равно от 10^8 Н/м^2 до 10^9 Н/м^2) наблюдается значительное снижение пучения почвы. При значениях lg*E* от 9 до 10 (*E* равно от 10^9 Н/м^2 до 10^{10} Н/м^2) пучение почвы практически отсутствует.

Таким образом, значение модуля линейных деформаций непосредственной почвы оказывает существенное влияние на величину пучения почвы.

3) *Горизонтальные и вертикальные смещения* горных пород в окрестности пластовой подготовительной выработки для глубины *H*=500 м; мощности непосредственной почвы

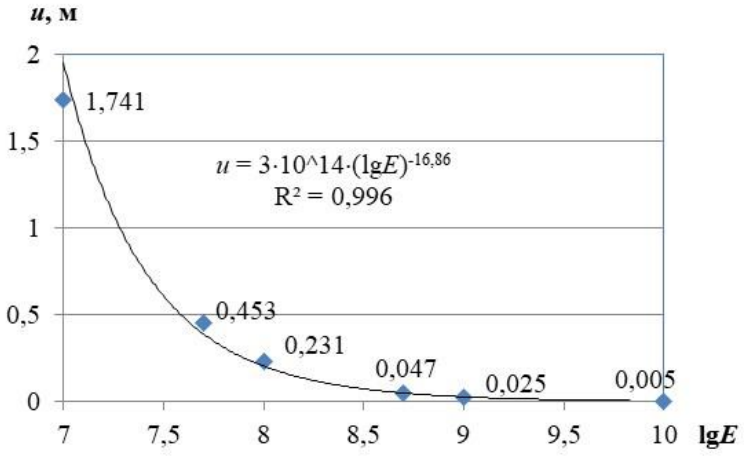

Рис. 3. Зависимость величины пучения почвы от значения модуля линейных деформаций непосредственной почвы (H = 400 м, m = 3 м)
Fig. 3. Dependence of the magnitude of soil heaving on the value of the linear deformation modulus of the immediate soil (H = 400 m, m = 3 m)

m=3 м; E= $5 \cdot 10^7$ Н/м^2 показаны на Рис. 4.

Горизонтальные смещения (Рис. 4а) являются симметричными относительно вертикальной оси выработки, наибольшие смещения наблюдаются в непосредственной почве пласта. Вертикальные смещения (Рис. 4б) указывают на поднятие почвы выработки.

4) *На втором этапе работы исследовалось влияние комплекса факторов на величину пучения*:

– глубина проведения выработки H изменялась от 200 м до 500 м;

– мощность m непосредственной почвы принимала значения от 0 до 12 м;

– модуль линейных деформаций непосредственной почвы E принимал значения $5 \cdot 10^7$ Н/м^2 до $5 \cdot 10^8$ Н/м^2.

Результаты выполненных численных

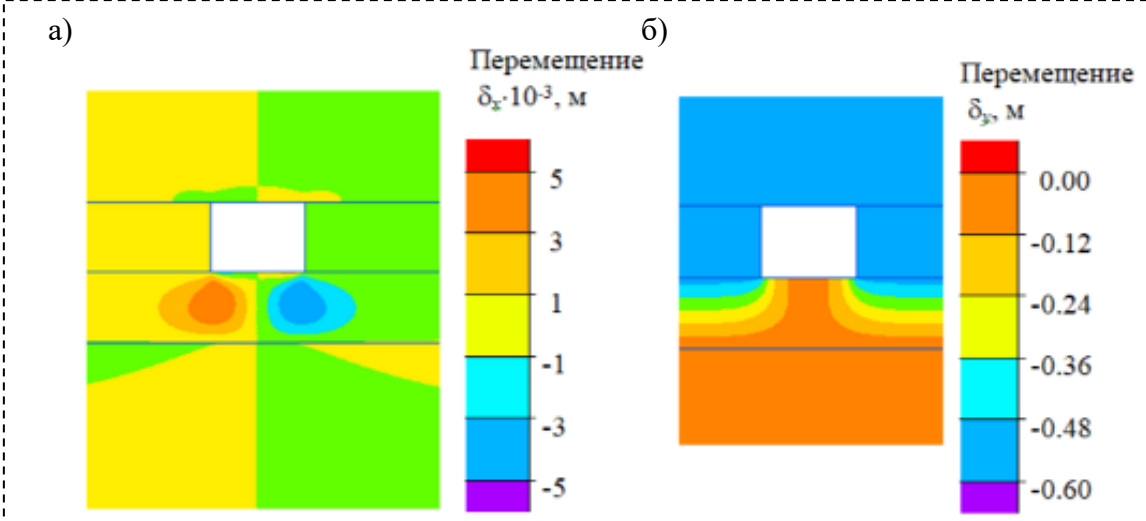

Рис. 4. Смещения горных пород в окрестности пластовой подготовительной выработки: а) горизонтальных; б) вертикальных
Fig. 4. Rock displacements in the vicinity of a bed development working: a) horizontal; b) vertical

Таблица. Значения величины пучения почвы u для различных значений модуля линейных деформаций E непосредственной почвы, ее мощности m и глубины проведения выработки H
Table. Values of soil heaving u for different values of the linear deformation modulus E of the immediate soil, its thickness m and the depth of the excavation H

E = $5 \cdot 10^7$ Н/м^2							
H, м	m, м						
	0	0,5	1,5	3	6	9	12
200	0,003	0,040	0,130	0,228	0,298	0,317	0,321
300	0,004	0,066	0,196	0,338	0,440	0,471	0,478
400	0,005	0,079	0,260	0,453	0,588	0,624	0,626
500	0,006	0,094	0,316	0,561	0,746	0,776	0,800
E = 10^8Н/м^2							
H, м	m, м						
	0	0,5	1,5	3	6	9	12
200	0,003	0,024	0,064	0,113	0,149	0,151	0,160
300	0,004	0,035	0,100	0,169	0,227	0,240	0,244
400	0,005	0,038	0,134	0,231	0,301	0,313	0,315
500	0,006	0,059	0,167	0,284	0,371	0,398	0,406
E = $5 \cdot 10^8$ Н/м^2							
H, м	m, м						
	0	0,5	1,5	3	6	9	12
200	0,003	0,007	0,014	0,024	0,032	0,033	0,035
300	0,004	0,10	0,021	0,036	0,047	0,049	0,050
400	0,005	0,014	0,028	0,047	0,063	0,068	0,069
500	0,006	0,017	0,037	0,061	0,079	0,084	0,086

экспериментов приведены в таблице.

Значение мощности непосредственной почвы m=0 означает, что вся почва имеет модуль линейных деформаций, равный модулю линейных деформаций вмещающих пород E = 10 Н/м^2.

Синим цветом в Таблице выделены значения величины пучения почвы, превышающие 0,2 м. Красным цветом выделены значения величины пучения почвы, превышающие 0,3 м. Анализ полученных результатов показывает, что величина пучения почвы возрастает с ростом глубины проведения выработки и мощности непосредственной почвы пласта. При этом увеличение модуля линейных деформаций непосредственной почвы пласта уменьшает величину пучения почвы. При мощности непосредственной почвы более 6 м наблюдается наибольшее значение ее пучения.

На Рис. 5 показана зависимость величины пучения почвы u от мощности непосредственной почвы m при модуле ее линейных деформаций E = 10^8 Н/м^2.

Анализ графика, представленного на Рис. 5, показывает, что при увеличении мощности непосредственной почвы до 3 м наблюдается пропорциональное увеличение величины ее пучения. При мощности почвы от 3 м до 6 м происходит уменьшение влияния мощности непосредственной почвы на величину пучения. Если мощность почвы принимает значения 6 м и более, то величина пучения стабилизируется без

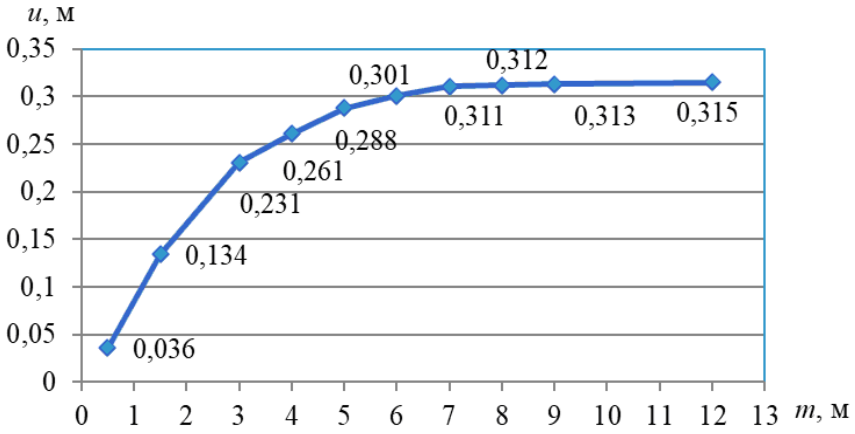

Рис. 5. Зависимость величины пучения почвы u от ее мощности m
Fig. 5. Dependence of the magnitude of soil heaving u on its thickness m

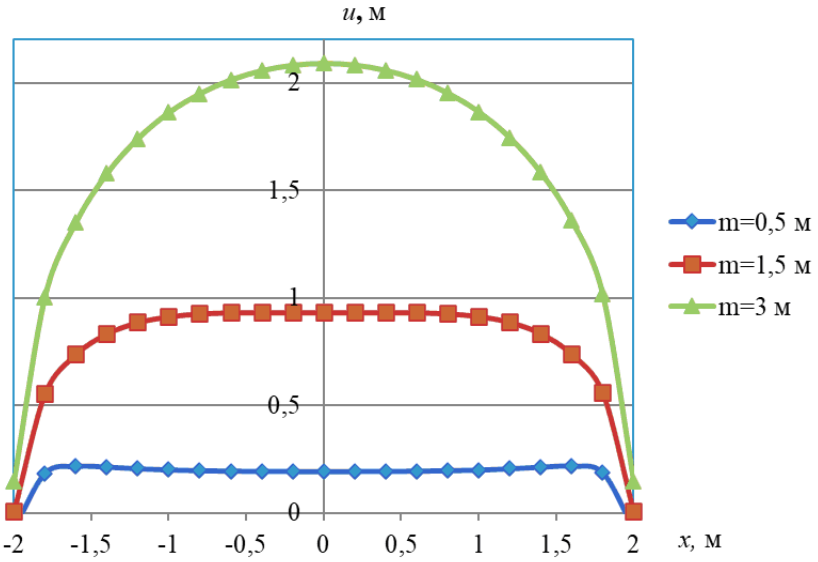

Рис. 6. Изменение величины пучения почвы по ширине выработки при различных значениях мощности непосредственной почвы
Fig. 6. Change in the magnitude of soil heaving across the width of the workings for different values of the thickness of the immediate soil

возрастания.

Три возможных различных варианта контура почвы при пучении показаны на Рис. 6. При мощности непосредственной почвы m=3 м и более контур почвы по ширине выработки имеет выпуклый куполообразный характер для любой глубины проведения выработки и при любом модуле линейных деформаций непосредственной почвы в рассматриваемых пределах их изменения. При мощности непосредственной почвы m=1,5 м наблюдается поднятие почвы без выпуклости в средней части. При мощности непосредственной почвы m=0,5 м наблюдается незначительное поднятие почвы с вогнутостью в средней части.

Зависимости величины пучения почвы u от глубины проведения подготовительной пластовой выработки H при различных значениях модуля линейных деформаций непосредственной почвы E показаны на Рис. 7.

Зависимость величины пучения почвы от глубины проведения выработки имеет возрастающий линейный характер при высоком уровне значимости. Следует отметить, что увеличение модуля линейных деформаций непосредственной почвы E пропорционально уменьшает величину пучения почвы. В рассматриваемом случае величина пучения почвы уменьшается в 2 раза при увеличении модуля упругости от значения E=5·10^7 МПа до значения E =10^8 МПа.

Заключение и выводы

1. Выполнена постановка задачи численного расчета методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния линейно-деформированного массива горных пород в окрестности пластовой подготовительной выработки с учетом ее непосредственной почвы.

2. Исследовано влияние глубины проведения выработки, деформационных характеристик и мощности непосредственной почвы на характер и величину пучения почвы.

3. При увеличении коэффициента поперечных деформаций непосредственной почвы от 0,2 до 0,45 величина пучения почвы уменьшается по параболическому закону. В пределах изменения этого коэффициента от 0,2 до 0,3 различие величин пучения почвы не превышает 10%.

4. Модуль линейных деформаций непосредственной почвы оказывает существенное влияние на величину пучения почвы при значениях менее 10^8 Н/м^2.

5. При увеличении мощности непосредственной почвы до 3 м наблюдается наибольшее приращение величины пучения почвы. При мощности почвы от 3 м до 6 м происходит снижение приращений величины пучения почвы. При мощности непосредственной почвы более 6 м приращение величины пучения почвы незначительно.

6. При мощности непосредственной почвы 3 м и более контур почвы по ширине выработки имеет выпуклый куполообразный характер. При мощности непосредственной почвы 1,5 м наблюдается поднятие почвы без выпуклости в средней части. При мощности непосредственной почвы 0,5 м наблюдается незначительное поднятие почвы с вогнутостью в средней части

7. С увеличением глубины проведения выработки от 200 м до 500 м величина пучения почвы линейно возрастает.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткачев В. А., Черных В. Г., Прозорова Ю. А. Исследование влияния горно-геологических и горнотехнических факторов на пучение почвы подготовительных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 4. С. 338–343.

2. Демин В. Ф., Яворский В. В., Демина Т. В., Стефлюк Ю. Ю. Разработка эффективных способов борьбы с пучением пород почвы в подготовительных выработках угольных шахт // Успехи современного естествознания. 2015. № 12. С. 95–99.

3. Максимов А. П. Выдавливание горных пород и устойчивость подземных выработок. М. : Госгортехиздат, 1963. 144 с.

4. Лыткин В. А. Механизм пучения пород в подземных выработках. М. : Недра, 1965 205 с.

5. Черняк И. Л. Предотвращение пучения почвы горных выработок. М. : Недра, 1978. 232 с.

6. Коваленко В. В., Рязанцев А. П. Обоснование параметров способа борьбы с пучением пород почвы в условиях угольных шахт: моногр. Д. : Национальный горный университет, 2013. 119 с.

7. Литвинский Г. Г. Механизм пучения пород почвы подготовительных выработок // Уголь. 1987. №2. С. 6–17.

8. Клыков А. Е., Широколобов Г. В. К расчету пучения почвы протяженной выработки // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 4(116). С. 43–48.

9. Литвинский Г. Г., Фесенко Э. В. Прогноз пучения пород почвы горных выработок – вероятностный аспект // Сб. научн. тр. Донбасского госуд. техн. ун-та. 2010. № 31. С. 168–177.

10. Король А. Ю. Закономерности деформирования горного массива вокруг одиночной горной выработки при пучении ее почвы // Геотехническая механика: межведомственный сборник научных трудов. 2014. № 115. С. 170–175.

11. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals (7th Edition). Butterworth-Heinemann. 2013. 756 p.

12. Сахно И. Г. Математическое моделирование деформационных процессов в подготовительных выработках при пучении почвы. // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 4. С. 78–86.

13. Гапеев С. Н., Лозовский С. П., Рязанцев А. П. Компьютерное моделирование процесса пучения почвы в подготовительных выработках // Сб. научн. тр. междунар. конф. «Неделя горняка». М. : МГГУ, 2003. Т. 1. С. 99–101.

14. Sakhno I., Petrenko A. Mechanical model and numerical analysis of a method for local rock reinforcing to control the floor heave of mining-affected roadway in a coal mine. // International Journal of Mining Science and Technology. 2022. Vol. 32. Issue 3. Pp. 415–426.

15. Мусин Р. А., Демин В. Ф., Ахматнуров Д. Р., Шмидт-Федотова И. М. Пучение вмещающих пород под влиянием горного давления: численное моделирование и анализ параметров // Горный журнал Казахстана. 2025. № 11. С. 8–11.

16. Казанин О. И., Сидоренко А. А., Ильинец А. А., Васильев В. Ф. Численные исследования пучения почвы штреков при применении разгрузочных щелей на шахте «Талдинская-Западная 2» // Известия ТулГУ. 2018. № 3. С. 171–178.

17. Sakhno I. Numerical Modeling of Controlling a Floor Heave of Coal Mine Roadways with a Method of Reinforcing in Wet Soft Rock // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 8. Art. 2895.

18. Xu L., Wang Y., Zhang Q. Mechanism and control of multi-level floor heave in soft rock roadways using high-resolution FLAC3D numerical modeling with stress-release simulation technology // Tunnelling and Underground Space Technology. 2025. Vol. 147. Art. 105123.

19. Штумпф Г. Г. , Рыжков Ю. А. , Шаламанов В. А. , Петров А. И. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна. Справочник. М. : Недра, 1994. 447 с.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Об авто*рах:
Гоголин Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, профессор, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2153-9358, e-mail: gva.pm@kuzstu.ru
Семенцов Вячеслав Владимирович, кандидат технических наук, исполнительный директор – первый заместитель генерального директора, АО «НЦ ВостНИИ», e-mail: v.sementsov@nc-vostnii.ru
Ермакова Инна Алексеевна, доктор технических наук, профессор, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2153-9358, e-mail: eia.pm@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:
Гоголин Вячеслав Анатольевич – постановка задачи, проведение расчетов, анализ результатов.
Семенцов Вячеслав Владимирович – научный менеджмент, постановка задачи, анализ результатов.
Ермакова Инна Алексеевна – проведение расчетов, написание текста, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

NUMERICAL ASSESSMENT OF SOIL HEAVING IN DEVELOPMENT WORKINGS OUTSIDE ZONE OF MINING OPERATIONS INFLUENCE

Viacheslav A. Gogolin[1], Viacheslav V. Semenetsov[2], Inna A. Ermakova[1]

[1] T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University
[2] JSC «NC VostNII»

* for correspondence: eia.pm@kuzstu.ru

Abstract.
This paper examines the soil heaving mechanism in development workings within a model of linear deformation of host rocks and coal seams. A problem

Article info
Received:
02 May 2026

Accepted for publication:
01 September 2026

Accepted:
15 September 2026

Keywords: *soil heaving, finite element method, stress-strain state, development workings*

statement and a computational model are proposed for determining the stress-strain state (SSS) of a rock mass, including roof rock, soil, immediate soil, and a coal seam. Soil swelling was not considered. The influence of mining operations on soil heaving in the development workings was ignored. The computational domain was the cross-section of the development workings, which embodies the plane-strain state of the rock mass. The SSS of the rock mass was calculated using the finite element method using the licensed ELCUT program. The influence of the deformation characteristics of the immediate soil on the magnitude of soil heaving was determined. The magnitude of soil heaving is primarily influenced by the modulus of linear deformation of the immediate soil. The highest value of the modulus of linear deformation of the seam soil was found, determining the critical value of soil heaving for maintaining the working's operability. The dependence of soil heave magnitude on the working depth and the immediate soil thickness was determined. It was found that as the immediate soil thickness increases, the heave magnitude increases to a certain value. As the immediate soil thickness changes, its contour varies, from convex to concave. The results of this study can be used to evaluate the effectiveness of methods for preventing soil heave in coal seam workings, such as anchoring, concreting, installing relief trenches, and others, under various mining, geological, and engineering conditions.

For citation: Gogolin V.A., Sementsov V.V., Ermakova I.A. Numerical assessment of soil heaving in development workings outside zone of mining operations influence. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 4(176):135-143. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-135-143, EDN: DLMXUZ

REFERENCES

1. Tkachev V.A., Chernykh V.G., Prozorova Yu.A. Study of the influence of mining-geological and mining-technical factors on soil heaving in development workings. *Mining information and analytical bulletin*. 2016; 4:338-343.

2. Demin V.F., Yavorsky V.V., Demina T.V., Stefluk Yu.Yu. Development of effective methods to combat soil heaving in development workings of coal mines. *Advances in modern natural science*. 2015; 12:95-99.

3. Maksimov A.P. Rock extrusion and stability of underground workings. M.: Gosgortekhizdat; 1963. 144 p. (In Russ.)

4. Lytkin V.A. Mechanism of rock heaving in underground workings. M.: Nedra; 1965. 205 p. (In Russ.)

5. Chernyak I.L. Prevention of soil heaving in mine workings. M.: Nedra; 1978. 232 p. (In Russ.)

6. Kovalenko V.V., Ryazantsev A.P. Justification of the parameters of the method for combating rock heaving in coal mines: monograph. D.: National Mining University; 2013. 119 p. (In Russ.)

7. Litvinsky G.G. Mechanism of rock heaving in development workings. *Coal.* 1987; 2:6-17.

8. Klykov A.E., Shirokolobov G.V. On the calculation of soil heaving in an extended working. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016; 4 (116):43-48.

9. Litvinsky, G.G., Fesenko E.V. Forecast of rock heaving in mine workings – a probabilistic aspect. *Coll. of scientific works of Donbass State Technical University*. 2010; 31:168-177.

10. Korol A.Yu. Regularities of rock mass deformation around a single mine working during heaving of its soil. *Geotechnical mechanics: interdepartmental collection of scientific papers*. 2014;115: 170–175.

11. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals (7th Edition). Butterworth-Heinemann. 2013. 756 p.

12. Sakhno I.G. Mathematical modeling of deformation processes in development workings during soil heaving. *News of universities. Mining journal.* 2019; 4:78-86.

13. Gapeev, S.N., Lozovsky S.P., Ryazantsev A.P. Computer modeling of the soil heaving process in development workings. *Coll. of scientific papers of the international. conf. "Miner's Week". M.: Moscow State Mining University;* 2003. Vol. 1. Pp. 99-101.

14. Sakhno I., Petrenko A. Mechanical model and numerical analysis of a method for local rock reinforcing to control the floor heave of mining-affected roadway in a coal mine. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2022; 32(3):415-426.

15. Musin R.A., Demin V.F., Akhmatnurov D.R., Shmidt-Fedotova I.M. Heaving of host rocks under the influence of rock pressure: numerical modeling and analysis of parameters. *Mining Journal of Kazakhstan*. 2025; 11:8-11.

16. Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Ilyinets A.A., Vasiliev V.F. Numerical studies of soil heaving in drifts using unloading cracks at the Taldinskaya-Zapadnaya 2 mine. *Bulletin of Tula State University*. 2018; 3:171-178.

17. Sakhno I. Numerical Modeling of Controlling a Floor Heave of Coal Mine Roadways with a Method of

Reinforcing in Wet Soft Rock. *Energies.* 2022; 15(8). Art. 2895.

18. Xu L., Wang Y., Zhang Q. Mechanism and control of multi-level floor heave in soft rock roadways using high-resolution FLAC3D numerical modeling with stress-release simulation technology. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2025; 147. Art. 105123.

19. Shtumpf G.G., Ryzhkov Yu.A., Shalamanov V.A., Petrov A.I. Physical and technical properties of rocks and coals of the Kuznetsk Basin. Handbook. M.: Nedra; 1994. 447 p. (In Russ.)

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Viacheslav A. Gogolin, Professor of the Department of Mathematics, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (Kemerovo, Russian Federation, 650000, Vesennyaya str., 28), DSc (Engineering), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2153-9358, e-mail: gva.pm@kuzstu.ru

Viacheslav V. Sementsov, Executive Director -First Deputy General Director of JSC «NC VostNII» (Kemerovo, Russian Federation, 650000, Institutskaya str., 3), DSc (Engineering), e-mail: v.sementsov@nc-vostnii.ru

Inna A. Ermakova, Professor of the Department of Mathematics, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (Kemerovo, Russian Federation, 650000, Vesennyaya str., 28), DSc (Engineering), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2153-9358, e-mail: eia.pm@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Viacheslav A. Gogolin – problem formulation, calculations, and results analysis.
Viacheslav V. Sementsov – scientific management, problem formulation, and results analysis.
Inna A. Ermakova – calculations, writing, and conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.